

## МИКРОМЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ИЕРАРХИЧЕСКИ ОРГАНИЗОВАННОГО БИОКОМПОЗИТА (ДЕНТИНА ЗУБОВ ЧЕЛОВЕКА)

Кабанова А.В.<sup>1</sup>, Кисельникова Л.П.<sup>2</sup>, Занг Ц.<sup>3</sup>, Панфилов П.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт естественных наук и математики, УрФУ, г. Екатеринбург, [gerbers13@mail.ru](mailto:gerbers13@mail.ru),

<sup>2</sup>Московский государственный медико-стоматологический университет, г. Москва,

<sup>3</sup>Институт материаловедения им. Э. Шмида, г. Леобен (Австрия)

Дентин – твердая ткань, обладающая иерархической структурой и состоящая из биоорганической и неорганической компонент в объемном соотношении 1:1. Хорошо известно, что биологической ткани присущи две базовые функции: (1) зарождение, формирование и функционирование, включая возникновение из клеток и регенерацию, в процессе жизнедеятельности и (2) собственно прочностные свойства. Дентин обладает наиболее простым строением, как по химическому составу, так и по структуре среди живых тканей. Это связано с отсутствием у него функции регенерации в процессе жизнедеятельности. Также дентин обладает уникальными механическими свойствами, зависящими от возраста пациента, определяющего соотношение между компонентами, и состояния гидроксиапатита кальция, сочетает в себе прочность и легкость, но в тоже время имеет низкую степень технологичности, в смысле возможности воспроизведения в лабораторных условиях. Если же найти оптимальную по сложности структуру и при этом сохранить прочностные свойства, то можно попытаться разработать тканезквивалентные материалы на основе дентина.

В научной литературе имеется большое количество работ, посвященных исследованию строения и прочностных свойств дентина, однако общепринятых представлений о взаимосвязи между его строением и механическими свойствами до сих пор нет. С одной стороны, это связано с трудностями при проведении исследований структуры и механических испытаний малоразмерных образцов, а также с невозможностью получения нужного количества образцов с одинаковой структурой из-за незначительного объема этой твердой ткани в зубе человека. Помимо этого, на результаты экспериментов существенным образом влияют такие факторы как хранение экспериментального материала, среда испытания, режимы нагружения и некоторые другие. Основная масса работ по дентину, опубликованных за последние двадцать лет, была выполнена либо биологами, либо специалистами по механике разрушения. А потому, интерес исследователей был сосредоточен в основном либо на анализе органической составляющей дентина, либо на создании моделей его разрушения

при разных типах нагружения. В результате чего имеющейся информации по взаимосвязи структуры и деформационного поведения дентина оказывается недостаточно для разработки на его основе биометрических конструктивных назначений.

Было показано, что в условиях одноосного сжатия дентин человека демонстрирует высокую упругость (до 30%), значительную пластичность (до 40%) при прочности, близкой к низколегированной стали (до 800 МПа) [Зайцев, 2011; Zaytsev, 2014]. Также оказалось, что дентину присущ ярко выраженный эффект формы, свойственный ряду наполненных полимеров [Zaytsev, 2014]. Однако при приложении растягивающей нагрузки (изгиб и диаметрально сжатие) на макроскопическом масштабе дентин демонстрирует отклик, присущий хрупким твердым телам, тогда как на мезоскопическом масштабе его поведение близко к поведению вязкоупругих материалов. Это согласуется с прямыми наблюдениями развитой пластической зоны перед вершиной магистральной трещины в дентине, в которой зарождаются и сливаются порообразные трещины. Налицо противоречие, требующее детального экспериментального исследования.

Целью работы является изучить взаимосвязь структуры дентина с его прочностными свойствами интактного (здорового) дентина подросткового в разных частях зуба (коронка, корень) на микро- и нано- масштабах

Образцы для исследования готовили из интактных моляров пациентов подросткового возраста, удаленных по медицинским показаниям, которые разрезали перпендикулярно главной оси зуба. Тонкие фольги для ПЭМ получали путем химического утонения в потоке концентрированной ортофосфорной кислоты по методу «окна». Исследование проводили на TEM/STEM JEOL2100F.

Изучался дентин зубов пациентов от 13 до 18 лет. Показано, что подростковый дентин имеет слоистую морфологию, толщина слоя 50–100 нм. Слои были ориентированы перпендикулярно главной оси зуба. На тонких участках около пульповой виден твидовый контраст, который указывает на то, что материал

находится либо в аморфном, либо в нано-кристаллическом состоянии. На электронограммах, снятых с тонких фольг, наблюдается диффузионное гало, характерное для аморфных твердых тел. В дентине пациентов 16–18 лет наблюдали сетки из коллагеновых волокон. Волокна имели толщину порядка 5 нм, что соответствует литературным данным о средней толщине волокна тропоколлагена, и не имели определенной ориентировки [Кабанова, 2016]. Элементный анализ, выполненный с помощью EDXA спектрометра микроскопа, показал, что в фольгах подросткового коронкового дентина неорганические составляющие гидроксиапатита кальция (Са, Р) присутствуют, в то время как в фольгах корневого дентина фосфора не было. Анализ электронограмм с этих участков показывает, что дентин, включая его минеральную составляющую, находится в аморфном состоянии. Таким образом, можно сделать вывод, что гидроксиапатит кальция в подростковом дентине находится в аморфном состоянии. Выделения частиц гидроксиапатита в подростковом дентине не наблюдалось.

Трещины в дентине появлялись в процессе приготовления образцов. В тонких фольгах трещины распространяются от края к центру образца. Угол раскрытия трещины составляет примерно 30°. Его свободный край трещины имеет эллипсоидальный профиль, в то время как ее край возле вершины трещины содержит микротрещины, которые выглядят как микропоры. Перед вершиной трещины всегда имеется светлый участок, окруженный непрозрачным материалом. Причиной появления прозрачной области в окрестности вершины трещины является утонение дентина за счет необратимой / пластической деформации впереди трещины. Эту светлую узкую полосу можно рассматривать как пластическую зону в окрестностях вершины трещины.

На микро-уровне трещины развиваются подобно трещинам в полимерных пленках и резине, когда появлению и росту трещины предшествует значительная

обратимая и необратимая деформация. Несмотря на острую вершину, трещина имеет неровные края, сложную форму и состоит из нескольких слившихся порообразных сателлитных трещин. У вершины трещины на траектории ее роста одна за другой расположены несколько порообразных сателлитных трещин. Сателлитные трещины перед вершиной располагаются внутри темной области. Можно предположить, что трещина должна распространяться внутри этой области. Однако в некоторых случаях фиксировали похожие темные области, но без трещин. Такой тип поведения трещин присущ упруго-пластичным полимерным пленкам и известен как «крейзинг» полимеров. Подобный характер роста трещин согласуется с высокими вязкоупругими свойствами дентина.

*Работа выполняется при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № № 15-08-04073а., КАВ) и РНФ (грант № 15-19-10007, ППЕ).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцев Д.В., Григорьев С.С., Антонова О.В., Панфилов П.Е. Деформация и разрушение человеческого дентина // Деформация и разрушение материалов. 2011. Том 6. С. 37-43.
2. Кабанова А.В., Панфилов П.Е., Занг З., Кисельникова Л.П., Шевченко М.А. Изучение строения дентина в постоянных интактных зубах у детей // Институт стоматологии, 2016, №3, С. 84–86.
3. Zaytsev D., Ivashov A.S., Mandra J.V., Panfilov P. On the deformation behavior of human dentin under compression and bending// Materials Science and Engineering C. 2014. Vol. 41, P. 83-90.
4. Zaytsev D., Panfilov P. Influences of the sample shape and compression temperature on the deformation behavior and mechanical properties of human dentin// Materials Science and Engineering C. 2014. Vol. 43. P. 607–613.